

(19)日本国特許庁 (J P)

(12) 公 開 特 許 公 報 (A)

(11)特許出願公開番号  
特開2001-108799  
(P2001-108799A)

(43)公開日 平成13年4月20日(2001.4.20)

| (51)Int.Cl. <sup>7</sup> | 識別記号    | F I                           | テマコード*(参考)        |
|--------------------------|---------|-------------------------------|-------------------|
| G 2 1 K                  | 5/02    | G 2 1 K 5/02                  | X 4 C 0 9 2       |
| H 0 1 L                  | 21/027  | H 0 5 H 1/24                  | 5 F 0 0 4         |
|                          | 21/3065 | H 0 1 L 21/30                 | 5 3 1 A 5 F 0 4 6 |
| H 0 5 G                  | 2/00    | 21/302                        | B                 |
| H 0 5 H                  | 1/24    | H 0 5 G 1/00                  | K                 |
|                          |         | 審査請求 未請求 請求項の数13 O L (全 15 頁) |                   |

(21)出願番号 特願平11-287567

(22)出願日 平成11年10月8日(1999.10.8)

(71)出願人 000004112

株式会社ニコン

東京都千代田区丸の内3丁目2番3号

(72)発明者 近藤 洋行

東京都千代田区丸の内3丁目2番3号 株  
式会社ニコン内

(72)発明者 村上 勝彦

東京都千代田区丸の内3丁目2番3号 株  
式会社ニコン内

(74)代理人 100094846

弁理士 細江 利昭

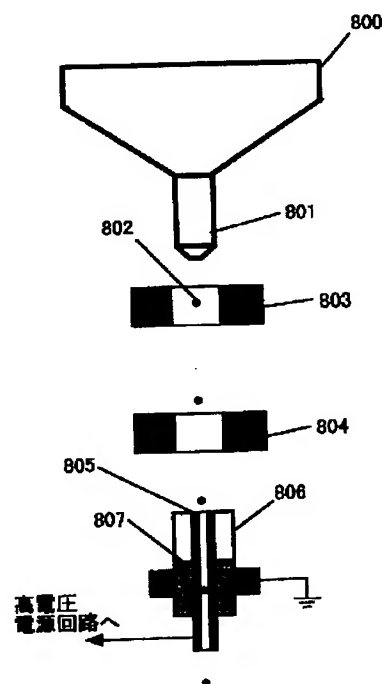
最終頁に続く

(54)【発明の名称】 X線発生装置、X線露光装置及び半導体デバイスの製造方法

(57)【要約】

【課題】 長時間安定してX線を発生できるX線発生装置を提供する。

【解決手段】 同軸状の電極のうち、アノード805電極の上方に、標的溜まり800に結合されたノズル801がおかれており、ノズル801からは標的物質である微粒子状の水酸化リチウムが噴出されるようになっている。微粒子状の標的物質802がアノード電極805先端部に到達したときに、絶縁部材807の表面で発生したプラズマシートがアノード電極805の先端に到達するようなタイミングで、アノード電極805-カソード電極806間にパルス電圧を印加する。このようにすることにより、微粒子状のターゲット物質を自動的に、しかも断続的に供給できるので長時間X線を発生させ続けることができる。また、微粒子の速度をモニターして放電のタイミングを制御することにより、強く安定したX線強度を得ることができる。



## 【特許請求の範囲】

【請求項 1】 電極間に高電圧パルスを印加することにより、電極材料又は電極近傍に存在する標的物質をプラズマ化し、当該プラズマより X 線を発生させる X 線発生装置であって、前記電極材料を連続的又は断続的に供給する供給手段を具備したことを特徴とする X 線発生装置。

【請求項 2】 請求項 1 に記載の X 線発生装置であって、プラズマによって侵食される前記電極の先端位置が略一定となるように当該電極の先端位置を制御する手段を具備したことを特徴とする X 線発生装置。

【請求項 3】 電極間に高電圧パルスを印加することにより、電極材料又は電極近傍に存在する標的物質をプラズマ化し、当該プラズマより X 線を発生させる X 線発生装置であって、前記標的 material が液体又は固体からなり、当該標的 material を連続的又は断続的に供給する供給手段を具備することを特徴とする X 線発生装置。

【請求項 4】 電極間に高電圧パルスを印加することにより、電極材料又は電極近傍に存在する標的物質をプラズマ化し、当該プラズマより X 線を発生させる X 線発生装置であって、前記標的 material が気体からなり、当該標的 material を断続的に供給する供給手段を具備したことを特徴とする X 線発生装置。

【請求項 5】 請求項 3 又は請求項 4 に記載の X 線発生装置であって、前記供給手段により供給された前記標的 material が前記電極先端近傍に到達したとき、又は前記電極先端近傍の標的 material の密度が所定の密度以上になったときにプラズマが発生するように、又はそれ以前に発生したプラズマが標的 material 位置に到達するように、当該電極間に印加される高電圧パルスの印加タイミングを制御する同期手段を具備することを特徴とする X 線発生装置。

【請求項 6】 電極間に高電圧パルスを印加することにより、電極材料又は電極近傍に存在する標的物質をプラズマ化し、当該プラズマより X 線を発生させる X 線発生装置であって、前記標的物質を超音速ガス流として供給することを特徴とする X 線発生装置。

【請求項 7】 電極間に高電圧パルスを印加することにより、電極材料又は電極近傍に存在する標的物質をプラズマ化し、当該プラズマより X 線を発生させる X 線発生装置であって、微粒子状の標的 material をガス中に混入させ、前記電極先端近傍に送出する送出手段を具備したことを特徴とする X 線発生装置。

【請求項 8】 電極間に高電圧パルスを印加することにより、電極材料又は電極近傍に存在する標的物質をプラズマ化し、当該プラズマより X 線を発生させる X 線発生装置であって、液滴状、液柱状、微粒子状又は気体状の標的 material を前記電極先端近傍に集中して送出する送出手段を具備したことを特徴とする X 線発生装置。

【請求項 9】 電極間に高電圧パルスを印加することにより、電極材料又は電極近傍に存在する標的物質をプラ

ズマ化し、当該プラズマより X 線を発生させる X 線発生装置であって、前記電極の少なくとも一方から前記標的 material を送出する送出手段を具備することを特徴とする X 線発生装置。

【請求項 10】 電極間に高電圧パルスを印加することにより、電極材料又は電極近傍に存在する標的物質をプラズマ化し、当該プラズマより X 線を発生させる X 線発生装置であって、前記標的 material として水酸化リチウム (LiOH) の微粒子、混濁液、溶液又は気体を用いることを特徴とする X 線発生装置。

【請求項 11】 電極間に高電圧パルスを印加することにより、電極材料又は電極近傍に存在する標的物質をプラズマ化し、当該プラズマより X 線を発生させる X 線発生装置であって、前記電極の少なくとも一方の電極、絶縁部材又はプラズマに曝される部分の部材が、利用する X 線の波長に対して透過率の高い物質を含む material からなることを特徴とする X 線発生装置。

【請求項 12】 マスク又はレチクル上に形成されているパターンをレジストが塗布されているウェハ上に転写する X 線露光装置であって、請求項 1 から請求項 11 のうちいずれか 1 項に記載の X 線発生装置を、露光用 X 線源として用いていることを特徴とする X 線露光装置。

【請求項 13】 請求項 12 に記載の X 線露光装置を用いて、マスク又はレチクル上に形成されているパターンをレジストが塗布されているウェハ上に転写する工程を有してなることを特徴とする半導体デバイスの製造方法。

## 【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、X 線顕微鏡、X 線分析装置、X 線露光装置などの X 線機器の X 線源として用いるのに好適な X 線発生装置、この X 線発生装置を使用した X 線露光装置、及びこの X 線露光装置を使用した半導体デバイスの製造方法に関するものである。

【0002】

【従来の技術】放電プラズマを用いた X 線源は小型であり、X 線量が多く、レーザー生成プラズマを用いた X 線源に比べて投入電力の X 線への変換効率が高く、また、低コストである。このため、放電プラズマを X 線源に用いた X 線顕微鏡の開発や、X 線露光装置用の放電プラズマ X 線源の研究が活発に行われている。

【0003】このような X 線源として例えば、Dense Plasma Focus (DPF) と呼ばれるものがあり、その概要が cymer 社のインターネットホームページ (<http://www.cymer.com/>) 中の論文「EUV (13.5nm) Light Generation Using Dense Plasma Focus Device」(以下「先行文献」という)に掲載され、さらには、特開平 10-319195 号公報 (以下「先行特許公報」という)に開示されている。

【0004】この方式の概略図を図 10 に示す。この方

式では、直流高電圧電源700によってコンデンサーC0に充電された電荷は、サイリスタやIGBT素子などからなるスイッチ701を閉じることによりコンデンサーC1へ移行する。コンデンサーC1に電荷が移行するにつれてC1の電圧が上昇する。この電圧は、同心状に設けられたアノード703-カソード702電極間に印加される。この電圧がピーク電圧に近づいたときに、予備電離光源（不図示）によりアノード703-カソード702電極間のガスを電離すると、電極間の放電が開始される。

【0005】放電開始直後は過飽和リアクトルSRにより電極間を流れる電流量が制限され、アノード703-カソード702電極間に配置されている絶縁体704表面で、縁面放電による均一なプラズマシートが発生する。縁面放電により発生したシート状のプラズマは、プラズマ中を流れる電流とそれに伴って発生する磁界との相互作用により、アノード電極703の先端方向に移動し、アノード電極703の先端付近に集まる。そして、アノード電極703先端に到達したときに、アノード先端部に存在するガスや、電極材料、又はターゲット物質をプラズマ化するとともに、強力な磁場によりプラズマを微小領域に閉じ込めて加熱する。これにより、プラズマからは、軟X線領域の電磁波が輻射される。

【0006】プラズマシートが電極間を移動中に、あるいは遅くともプラズマシートがアノード電極703先端に到達するときまでに可飽和リアクトルSRは飽和し、大電流がアノード703-カソード702間を流れてプラズマを圧縮、加熱する。

【0007】

【発明が解決しようとする課題】従来、このような放電励起方式のX線源では、ターゲット材料は電極周囲に存在している雰囲気ガスや、電極材料、あるいは電極の上におかれた物質であった。

【0008】このうち、雰囲気ガスをターゲット材料として用いる場合には、以下のような問題点がある。すなわち、一般に軟X線は物質による吸収が大きいので、雰囲気ガスの圧力を高くすることができない。一般にはチャンパー内の雰囲気ガスの圧力は10Torr以下程度とする必要がある。このため、雰囲気ガスをターゲットとして用いる場合には、ガス圧が低いのでターゲット物質の密度が小さく、X線の発生強度が著しく小さくなる。前記先行文献では、雰囲気ガスとして0.1TorrのXeと0.2TorrのArを用いて実験を行っているが、発生したX線のスペクトルにほとんど違いはなく、X線発生に起因しているのは電極材料であるタングステン(W)からのものである。この実験結果からも、実質的に雰囲気ガスをターゲット材料として用いることはできないことがわかる。

【0009】また、電極をターゲット材料として用いる場合には、放電によって流れる大電流により、電極が溶融したり削られたりして、電極形状が変化してしまい、長時間安定して動作させることができないという問題点

がある。放電により短くなったり変形してしまった電極は、装置の運転を停止して人手により交換しなくてはならず、運転効率が著しく低くなってしまふ。さらに、削られた電極材料が飛散し、周囲におかれた光学部品に付着して、光学性能（反射率や透過率など）を低下させてしまふ問題も生じていた。

【0010】一方、アノード電極上にターゲット物質を置く場合には、電極上におかれた物質からのX線スペクトルを得ることができる。しかし、これまでは電極上に人手によりターゲット物質を置いて放電させていたため、連続して長時間運転することができなかった。また、標的材料として、前記先行文献ではリチウム(Li)結晶が用いられており、前記先行特許公報ではLi結晶の他に水素化リチウム(LiH)を用いることが提案されているが、どちらの物質も反応性が高く危険であり、取り扱いが難しい。これらの物質は特に水と激しく反応する。このため、真空容器を大気圧にしたときに、真空容器内に残留していたLiやLiHと大気中の水とが爆発的に反応する危険がある。

【0011】従来のX線発生装置にはこのような問題点があるため、このようなX線発生装置を線源として用いたX線露光装置にも同様の問題点が生じ、従って、このようなX線露光装置を用いて半導体デバイスの製造を行う場合、頻繁にX線露光装置を停止しなければならないので、製造のスループットが低下してしまうという問題点があった。

【0012】本発明はこのような従来技術の問題点を鑑みてなされたもので、電極をターゲットとして用いる場合、電極以外の物質をターゲットとして用いる場合のいずれにおいても、長時間安定してX線を発生できるX線発生装置を提供すること、電極材料やその周辺部材が大電流やプラズマにより削られ周囲に飛散したとしても、光学性能の低下を緩和できるX線発生装置を提供すること、取扱に危険のないX線発生装置を提供すること、及びこのような特徴を有するX線露光装置を提供すること、スループットの良い半導体デバイスの製造方法を提供することを課題とする。

【0013】

【課題を解決するための手段】前記課題を解決するための第1の手段は、電極間に高電圧パルスを印加することにより、電極材料又は電極近傍に存在する標的物質をプラズマ化し、当該プラズマよりX線を発生させるX線発生装置であって、前記電極材料を連続的、又は断続的に供給する供給手段を具備したことを特徴とするX線発生装置（請求項1）である。

【0014】本手段においては、プラズマにより電極が溶融したり削られたりして侵食されても、侵食された分に相当する電極材料を新たに、連続的又は断続的に供給してやることができるので、装置を止めて電極を交換したり、電極の位置調整を行ったりする必要がない。よっ

て、装置を長時間に亘って連続運転することができる。なお、本明細書において「連続的に供給する」とは、ある時間に亘って切れ目なく供給することをいい、「断続的に供給する」とは、ある時間に亘って間隔を置いて継続的に供給することをいう。両者とも、必ずしも無限時間に亘って供給を続けることができることを意味せず、所定時間の間、装置を停止することなく供給できることを含む概念である。

【0015】前記課題を解決するための第2の手段は、前記第1の手段であって、プラズマによって侵食される前記電極の先端位置が略一定となるように当該電極の先端位置を制御する手段を具備したことを特徴とするX線発生装置（請求項2）である。

【0016】本手段においては、例えば侵食された電極の先端位置を検出器により検出し、検出された先端位置が略一定位置となるように、電極材料の供給量を操作する。これにより、プラズマの発生位置、発生条件が一定となり、長時間に亘って特性の安定したX線源とすることができる。なお、「略一定」とは、プラズマの発生位置、発生条件から許容される範囲で、ある程度の誤差が許されることを意味するものである。本発明は、例えば、位置の許容範囲を定め、その範囲にあるときは何もアクションを採らず、その範囲外になったとき、範囲内に入れるようなアクションを採るような場合を含むものである。

【0017】前記課題を解決するための第3の手段は、電極間に高電圧パルスを加加することにより、電極材料又は電極近傍に存在する標的物質をプラズマ化し、当該プラズマよりX線を発生させるX線発生装置であって、前記標的物質が液体又は固体からなり、当該標的物質を連続的又は断続的に供給する供給手段を具備することを特徴とするX線発生装置（請求項3）である。

【0018】本手段においては、液体又は固体からなる標的物質が連続的又は断続的に供給される。標的物質が連続的に供給される場合には、その間連続運転をすることができるので、装置を長時間に亘って連続運転することができる。プラズマの発生は、パルス的に行われるので、標的物質は連続的に供給する必要はなく、断続的に行えば十分である。この場合にも、装置を長時間に亘って連続運転することができる。なお、標的物質が液体又は固体であるとは、標的物質である液体又は固体が、気体によって搬送されて供給される場合をも含むものであり、この場合の搬送気体自体が標的物質である場合をも含むものである。

【0019】前記課題を解決するための第4の手段は、電極間に高電圧パルスを加加することにより、電極材料又は電極近傍に存在する標的物質をプラズマ化し、当該プラズマよりX線を発生させるX線発生装置であって、前記標的物質が気体からなり、当該標的物質を断続的に供給する供給手段を具備したことを特徴とするX線発生

装置（請求項4）である。

【0020】本手段においても、標的物質を断続的に供給することにより、装置を長時間に亘って連続運転することができる。

【0021】前記課題を解決するための第5の手段は、前記第3の手段又は第4の手段であって、前記供給手段により供給された前記標的物質が前記電極先端近傍に到達したとき、又は前記電極先端近傍の標的物質の密度が所定の密度以上になったときにプラズマが発生するように、又はそれ以前に発生したプラズマが標的物質位置に到達するように、当該電極間に印加される高電圧パルスの印加タイミングを制御する同期手段を具備することを特徴とするX線発生装置（請求項5）である。

【0022】本手段は、前記第3の手段又は第4の手段において、標的物質が断続的に供給される場合に適用されるものである。本手段においては、標的物質が電極先端位置近傍位置に到達したこと、又は前記電極先端近傍の標的物質の密度が所定の密度以上になったこと（気体の場合）を検出器等により直接又は間接的に検知し、そのときにプラズマが発生するように、電極間に印加される高電圧パルスの印加タイミングを制御する。また、例えば、前記DPF方式のように、発生したプラズマが移動して電極先端位置にフォーカスされるような場合には、プラズマシートが閉じ込められる微小領域（プラズマがフォーカスされる位置）に達したとき、丁度、標的物質がその微小領域に到達するようにする。このようにすれば、最適な条件で標的物質をプラズマ化できるので、発生するX線の強度を強くすることができる。

【0023】なお、「間接的に検知する」とは、直接標的物質を検知するのでなく、例えば標的物質の供給を断続的に制御するパルスの作動タイミングから、標的物質が前記電極先端近傍に到達したタイミングや、電極先端近傍の標的物質の密度が所定の密度以上になったことを検知するようなことをいう。

【0024】前記課題を解決するための第6の手段は、電極間に高電圧パルスを加加することにより、電極材料又は電極近傍に存在する標的物質をプラズマ化し、当該プラズマよりX線を発生させるX線発生装置であって、前記標的物質を超音速ガス流として供給することを特徴とするX線発生装置（請求項6）である。

【0025】本手段は標的物質が気体である場合に適用されるものである。これらの標的物質を超音速ガス流として供給することにより、標的物質は断熱冷却され、その結果ファン・デル・ワールス力によりガス原子が互にくっつきあって大きなクラスター分子となるので、発生するX線の強度を上げることができる。また、超音波ガス流はノズルから噴出された後でもガス（クラスター）の広がりが少ないので、前述のDPF法を使用したような場合に、プラズマシートがフォーカスされる位置でも、高密度の状態を維持でき、その結果、発生するX

線の強度を上げることができる。

【0026】前記課題を解決するための第7の手段は、電極間に高電圧パルスを印加することにより、電極材料又は電極近傍に存在する標的物質をプラズマ化し、当該プラズマよりX線を発生させるX線発生装置であって、微粒子状の標的材料をガス中に混入させ、前記電極先端近傍に送出する送出手段を具備することを特徴とするX線発生装置（請求項7）である。

【0027】固体状又は液体状の標的材料を使用する場合、その粒径を小さくし、微粒子状として使用すると、粒子径が大きい場合に比べて体積に対する表面積が大きくなるので、全体の温度が上がって高温のプラズマを容易に得ることができる。また、微粒子個々の孤立したプラズマが形成できるため、熱伝導によりプラズマ温度の低下を緩和することができる。従って、高温プラズマを維持でき、X線強度が高くなる。よって、標的部材を微粒子状として用いることが好ましいが、この場合、ガスを搬送手段として電極先端近傍に送出すると、容易に供給することができる。さらに、プラズマの発生に寄与しなかった残りの標的部材を、ガス流と共に外部に容易に排出することができる。キャリアーガスとしては、使用するX線の波長に対して大きな透過率を持つものを使用することが好ましい。なお、微粒子としては、比較的大きな微粒子を単体で用いることもできるし、微細な微粒子を、微粒子群として用いることもできる。

【0028】前記課題を解決するための第8の手段は、電極間に高電圧パルスを印加することにより、電極材料又は電極近傍に存在する標的物質をプラズマ化し、当該プラズマよりX線を発生させるX線発生装置であって、液滴状、液柱状、微粒子状又は気体状の標的材料を前記電極先端近傍に集中して送出する送出手段を具備することを特徴とするX線発生装置（請求項8）である。

【0029】ここに、「電極先端近傍に集中して送出する」とは、電極先端近傍を通過し、その他の場所に広がらないように送出すること、広い送出口から電極先端近傍に集まるように送出することをいう。電極先端近傍は、プラズマが発生する位置であり、前記DPF法の場合は、プラズマシートがフォーカスされる位置である。この位置に標的材料が集中して送出されるため、送出される材料のほとんどがプラズマの発生に寄与することになり、発生するX線の強度が高くなる。

【0030】前記課題を解決するための第9の手段は、電極間に高電圧パルスを印加することにより、電極材料又は電極近傍に存在する標的物質をプラズマ化し、当該プラズマよりX線を発生させるX線発生装置であって、前記電極の少なくとも一方から前記標的材料を送出する送出手段を具備したことを特徴とするX線発生装置（請求項9）である。

【0031】本手段においては、電極そのものを標的材料送出手段として用いている。プラズマは電極先端近傍

で発生するので、本手段においては、プラズマ発生部に効率的に標的部材を送り込むことができる。よって、プラズマ化の効率を高め、X線強度を高めることができる。プラズマが先端近傍で発生する電極、又は発生したプラズマが先端部にフォーカスされる電極を標的材料送出手段として用いた場合には、特にその効果が大きい。プラズマが先端近傍で発生する電極、又は発生したプラズマが先端部にフォーカスされる電極以外の電極を標的材料送出手段として用いた場合でも、プラズマ発生位置近くから標的材料の送出を行うことができるので、ある程度の効果が得られる。

【0032】前記課題を解決するための第10の手段は、電極間に高電圧パルスを印加することにより、電極材料又は電極近傍に存在する標的物質をプラズマ化し、当該プラズマよりX線を発生させるX線発生装置であって、前記標的材料として水酸化リチウム(LiOH)の微粒子、混濁液、溶液又は気体を用いることを特徴とするX線発生装置（請求項10）である。

【0033】Li原子はプラズマ化した場合、波長が13.5 nmのX線を発生するので、X線露光装置等のX線発生器として好ましい。しかしながら、Liを単体で用いた場合、LiHを用いた場合には、前述のように反応性が高く、特に大気中の水との反応により爆発する危険がある。そこで、本手段においては、標的材料として水酸化リチウム(LiOH)を用いることにしている。水酸化リチウムの場合には、前述のような危険がない。また、水酸化リチウムは水溶性の固体であるので、固体のままでも、また溶媒に溶かして液体としても、加熱して気体としても、標的材料として用いることができ好ましい。

【0034】前記課題を解決するための第11の手段は、電極間に高電圧パルスを印加することにより、電極材料又は電極近傍に存在する標的物質をプラズマ化し、当該プラズマよりX線を発生させるX線発生装置であって、前記電極の少なくとも一方の電極、絶縁部材又はプラズマに曝される部分の部材が、利用するX線の波長に対して透過率の高い物質を含む材料からなることを特徴とするX線発生装置（請求項11）である。

【0035】前述のように、放電プラズマを用いたX線発生装置においては、プラズマにより電極や絶縁材料、その他プラズマに曝される部分が、削られたり熔融したりして飛散し、周囲に置かれた光学部品の表面に付着して、光学性能を低下させる。本手段においては、これらの部材として、利用するX線の波長に対して透過率の高い物質を含む材料を使用しているので、たとえこれらの物質が光学部材の表面に付着しても、その光学性能の低下が少なく抑えられる。よって、光学素子を長時間に亘って交換したり手入れをしたりすることなく連続使用することができる。なお、部材を構成する物質中に、利用するX線の波長に対して透過率の低い物質が同時に含ま

れている場合は、これらの材料を外部に有効に排出又は排除することができるが好ましい。

【0036】なお、波長13.5nmのX線を使用する場合には、透過率の面でSiを用いることが好ましい。電極間の絶縁材料としては、Si単体で用いることが難しいが、Siの化合物であるSiO<sub>2</sub>を使用することができる。プラズマ化されたSiO<sub>2</sub>はSiとOに分解される。13.5nmのX線のOに対する透過率は高くないが、Oは気体となって排気系統から放出されてしまうので、光学部材に付着することがない。

【0037】前記課題を解決するための第12の手段は、マスク又はレチクル上に形成されているパターンをレジストが塗布されているウェハ上に転写するX線露光装置であって、前記第1の手段から第11の手段のいずれかに係るX線発生装置を、露光用X線源として用いていることを特徴とするX線露光装置（請求項12）である。

【0038】本手段においては、X線発生装置が前記第1の手段から第11の手段のいずれかに係るものであるため、各手段において説明したのと同じ作用効果が得られ、それぞれ、長時間連続運転できるX線露光装置、X線の発生効率の良いX線露光装置、安全性が高いX線露光装置とすることができる。

【0039】前記課題を解決するための第13の手段は、前記第12の手段であるX線露光装置を用いて、マスク又はレチクル上に形成されているパターンをレジストが塗布されているウェハ上に転写する工程を有してなることを特徴とする半導体デバイスの製造方法（請求項13）である。

【0040】本手段においては、半導体デバイス製造のスループットが良い半導体デバイスの製造方法、安全性の高い半導体デバイスの製造方法とすることができる。

【0041】

【発明の実施の形態】以下、本発明の実施の形態の例を図を用いて詳細に説明する。図6は、本発明の実施の形態の基本構成の1例を示す概要図である。図6では放電プラズマX線源としてDense Plasma Focus (DPF)を用いており、高電圧電源部や真空容器などは省略してある。また、図6では標的材料送出手段としてノズルが用いられている。

【0042】同軸状の電極のうち、アノード電極805の上方に、標的溜まり800に結合されたノズル801がおかれており、ノズル801からは標的物質である微粒子状の水酸化リチウム(LiOH)が噴出されるようになっている。噴出された水酸化リチウムの微粒子802はアノード電極805の直上に落下するように配置されている。2つの微粒子位置検出器803、804は、それぞれ落下した水酸化リチウムの微粒子802がその中を通過した時間を検知し、これから微粒子802の速度が求められる。そして、これより微粒子802がアノード電極先端部に到達する時刻が求

められるので、微粒子802がアノード電極805の先端部に到達したときに、絶縁部材807の表面で発生したプラズマシートがアノード電極805の先端に到達するようなタイミングで、アノード電極805-カソード電極806間にパルス電圧を印加する。

【0043】このようにすることにより、微粒子状のターゲット物質を自動的に、しかも断続的に供給できるので長時間X線を発生させ続けることができる。また、微粒子の速度をモニターして放電のタイミングを制御することにより、強く安定したX線強度を得ることができる。この実施の形態は、請求項3、請求項5、請求項8、請求項10に対応するものである。

【0044】図6においては、標的物質として単体の微粒子を用いているが、単体の微粒子に代えて、多数の微粒子からなる微粒子群を用いてもよい。微粒子群を用い、その分だけ微粒子の径を小さくすることにより、前述のように高温のプラズマを得ることができ、その分X線の強度を上げることができる。たとえば水酸化リチウムや錫(Sn)あるいは酸化錫(SnO<sub>2</sub>)などの微粒子や微粒子群を用いてもよい。また、標的物質として固体でなく液体、又は液体と固体の混濁液を用いることもできる。

【0045】図7は、本発明の実施の形態の基本構成の他の例を示す概要図である。図7でも放電プラズマX線源としてDense Plasma Focus (DPF)を用いており、高電圧電源部は省略してある。アノード電極901は絶縁部材903及び接触子914を貫通しており、絶縁部材904を介して直線ステージ905によりアノード電極901を押し出すことができるようになっている。接触子914とアノード電極901とは電氣的に導通しており、接触子914が電源（不図示）に接続されている。また、カソード電極902は真空容器900に接地されている。

【0046】アノード電極901の先端位置はCCDカメラ911により常時あるいは定期的にモニターされている。照明用光源906から発せられた光は照明用レンズ907、窓908を介してアノード電極901を照明する。照明光のアノード電極透過光あるいは反射光は、窓909を通過した後、対物レンズ910によりCCDカメラ911上に拡大され結像される。CCDカメラ911の映像はフレームメモリ912により取り込まれ、さらにコンピュータ913に取り込まれる。

【0047】予め運転開始前のアノード電極901の像をコンピュータ913内に取り込んでおく。運転中は常時あるいは定期的にアノード電極901像をコンピュータ913内に取り込み、運転開始前のアノード電極901の像と比較する。比較の結果、アノード電極901の先端位置が許容範囲を超えていたならば、直線ステージ905を駆動しアノード電極901の先端が所定の位置に来るようにする。

【0048】このようにすることにより、アノード電極901を連続的又は断続的に供給することができるので、放電によりアノード電極901が削られてきても、従来の



ように装置の運転を止めて短くなった電極を交換する必要がなく、運転効率が向上する。また、アノード電極901の先端位置が常に同じ場所に保持されるので、放電が安定してX線強度が安定すると共に、X線発生位置の変動も低減することができる。この実施の形態は、請求項1、請求項2に対応している。

【0049】図1に、本発明の実施の形態であるX線発生装置の第1の具体的な構成の概要を示す。本実施の形態においては、放電プラズマX線源として図6に示した様式のDense Plasma Focus(DPF)を用いている。すなわち、アノード電極107とカソード電極106の間に高電圧のパルス印加すると絶縁部材109の表面からプラズマシートが発生し、電極間を上昇して、アノード電極107の先端部にフォーカスされるようになっている。なお、DPFの電源部は省略してある。真空容器100及び101内は真空排気装置124により、プラズマから放射されたX線が吸収されて著しく減衰してしまわないような圧力（例えば10 Torr以下）にまで減圧されている。

【0050】本実施の形態では標的材料送出機構としてノズル103を用い、標的材料108を真空容器内に噴出させている。ノズル103の内径は約10 $\mu$ mで、その付け根にはピエゾ振動子104が取り付けられている。そして、このピエゾ振動子104によって約1MHzの周波数の微少な振動をノズル103に与えることにより、ノズル先端から噴出する標的材料108は液滴状とされている。

【0051】本実施の形態では標的材料108として水酸化リチウム(LiOH)水溶液を用いており、水酸化リチウムの水溶液120が標的溜まり119に入れられている。標的溜まり119には窒素ガスポンプ（不図示）がつながれており、これにより標的溜まり119には約10気圧の圧力がかけられ、水酸化リチウムの水溶液120をノズル103の方に押し出している。

【0052】本実施の形態ではプラズマ中のリチウムイオンから発せられる13.5nmの線スペクトルを後段のX線光学系で利用している。液滴状の標的材料108がアノード電極107の直上に落下するようにノズル103およびアノード電極107の位置が決められている。カソード電極106は真空容器100に取り付けられ、絶縁部材109を介してアノード電極107を保持している。

【0053】検出器105は、その中を標的材料108が通過すると信号を発する。この信号は制御装置（不図示）に入力されている。制御装置は、この信号に基づいて、標的材料108がアノード電極107の先端に到達したときにプラズマシートもアノード電極107の先端に到達するように、ピエゾ振動子の振動周波数や放電スイッチのトリガー周波数とトリガータイミングを微調整している。

【0054】アノード電極107は筒状になっており、プラズマ生成に寄与しなかった標的材料108は、アノード電極107の中を通過してトラップ110内に落下する。トラップ110、111は、冷却ステージ114、熱伝導体113を介し

て、液体窒素が入れられている冷却槽115により冷却されており、トラップ110内に落下してきた標的材料108（水酸化リチウム）は、即座に冷却されて固化する。固化した水酸化リチウムの蒸気圧は十分に低いので真空容器内の圧力を低い状態に保持することができる。

【0055】トラップは真空容器内に2つ（110、111）、予備室102に1つ（112）おかれている。真空容器内の2つのトラップのうち1つ（110）は標的材料の固化に使用されているが、もう一つのトラップ（111）は冷却されているだけである。トラップ110内に固化した水酸化リチウムが溜まったならば、トラップ110を予備室102内に移すとともに、トラップ111を標的材料固化用に使用し、予備室102にあったトラップ112をトラップ111のあった位置に持ってきて冷却を開始する。

【0056】なお、当然のことであるが、トラップを予備室に移動させる際には予め予備室内は真空ポンプにより予め排気され、予備室102内が真空になった段階で、ゲートバルブ117をあけてトラップの移動を行う。こうすることにより、真空容器100及び101内の真空度を悪化させずに作業を行うことができる。予備室102内に運ばれたトラップはゲートバルブ117を閉めた後、予備室102内を大気圧に戻し、ゲートバルブ123を開けた後、ヒーター121により加熱される。このようにして、固化したLiOHを液体に戻し、容器122内に溜めた後、ポンプ116により配管118を通して標的溜まり119に戻す。

【0057】以上のように標的材料の回収・循環手段を具備することにより、連続的に標的物質を供給でき安定したX線強度を得ることができる。また、アノード電極部のところを液滴が通過するため、放電によって加熱されたアノード電極を冷却することも可能である。本実施の形態は、請求項3、請求項5、請求項8、請求項10に対応している。

【0058】上述の実施の形態では標的材料に水酸化リチウムの水溶液を用いているが、これに限らず、プラズマ化されることにより目的とする波長のX線が発生するものであれば、どのような液体であってもよい。また、液体中に固体微粒子を混ぜた混濁液であってもよい。たとえば、エタノール中に水酸化リチウムの微粒子を混ぜたものであってもよい。また、液体は常温で液体であるもののみならず、加熱あるいは冷却した状態で液体となるものを、加熱あるいは冷却することによって液体化したものでもよい。

【0059】また、液滴を生成するのにノズル103を振動させているがこれに限らず、どんな方法で液滴を生成してもよい。また、生成したプラズマシートが上方に移動し、アノード電極107の上端付近でフォーカスされるようにし、液滴がその位置を通過したときにプラズマ化されるようにしているが、図1においてアノード電極107、カソード電極106、絶縁部材109で構成されている部分の上下を反転させて、図1におけるA側を上側とし、

こちら側から液滴がアノード107中を通過するようにして、液滴がアノード電極107から外に出るときにプラズマ化されるようにしてもよい。また、この場合には液滴を形成するノズル103がアノード電極となるように、プラズマ発生部を形成するようにしてもよい。このようにすることにより、請求項9にも対応する実施の形態とすることができる。

【0060】本実施の形態では、プラズマ生成に寄与しなかった液滴を冷却して固化しているが、もし、標的材料の蒸気圧が液体の状態では真空容器100や101内の圧力よりも低ければ、液体の状態でも循環させてもよい。また、本実施の形態では、検出器105により標的微粒子の検出を行い、標的材料が電極先端に到達するタイミングとプラズマがフォーカスするタイミングの同期をとっているが、標的微粒子が送出される周期が安定している場合には、このような標的材料を検出する手段を特別設けなくてもよい。

【0061】図2に、本発明の実施の形態であるX線発生装置の第2の具体的な構成の概要を示す。この実施の形態においては、前記図1に示した実施の形態と同様にDPFを用い、液体状の標的材料を用いている。すなわち、カソード電極204は真空容器200に取り付けられ、絶縁部材207を介してアノード電極205を保持している。アノード電極205とカソード電極204の間に高電圧のパルスを印加すると絶縁部材207の表面からプラズマシートが発生し、電極間を上昇して、アノード電極205の先端部にフォーカスされるようになっていく。なお、DPFの電源部は省略してある。真空容器200及び201内は真空排気装置222により、プラズマから放射されたX線が吸収されて著しく減衰してしまわないような圧力（例えば10 Torr以下）にまで減圧されている。

【0062】標的材料は、図1に示した実施の形態とは異なり、ノズルから液滴としてではなく、連続的に噴出され液柱状となっている。そして、標的材料206がアノード電極205の直上に落下するようにノズル203およびアノード電極205の位置が決められている。

【0063】本実施の形態ではターゲット材料にキセノン(Xe)を使用している。バルブ227、228は閉じられている。この状態で、バルブ225、226を開けて、ターゲット溜り217内にポンペ223からキセノンガスを20～30気圧で供給するとともに、ターゲット溜り217を、熱伝導体220を介して液体窒素が入れられた冷却槽216により約170K～200Kに冷却する。そうするとキセノンガスは液化し、ターゲット溜まり217内に液化キセノン218として蓄積される。

【0064】液化されたキセノンは内径10 $\mu$ mのノズル203から噴出される。液化キセノンは表面張力が小さいため、図1に示した実施の形態におけるような液滴ではなく、連続的に噴出する液柱206となる。そして、この液柱にDPF電極からのプラズマが到達したときに、

標的材料である液化キセノンがプラズマ化され、X線を放出する。

【0065】図1に示した実施の形態と同様に、プラズマ化されなかった液化キセノンの液柱206はアノード電極205の中心を通り、真空容器201内のトラップ208内に落下する。トラップ208、209は、熱伝導体211を介して液体窒素貯蔵槽213内の液体窒素により冷却されている冷却ステージ212上に保持されて冷却されている。よって、トラップ208内に落下した液化キセノンは直ちに固化する。

【0066】トラップ208内に固化したキセノンで満たされたならば、予備室202を真空にした後、ゲートバルブ215を開とし、トラップ208を予備室202に移動して、あらかじめ冷却されていたトラップ209を標的材料固化用に使用する。また、予備室202にあったトラップ210をトラップ209のあった位置に持ってきて冷却を開始する。予備室内に移動されたトラップ208は、ゲートバルブ215を閉じた後、ヒーター219により加熱し、固化していたキセノンを蒸発させる。

【0067】ガスとなったキセノンは、バルブ221を通った後、コンプレッサー214により圧縮され、配管を通過してポンペ224に蓄積される。運転を続けて、ポンペ223のキセノンガスがなくなったならばバルブ225、226を閉じ、バルブ227、228を開けて、ポンペ224からキセノンを供給すると共に、ポンペ223を回収用のポンペとして使用する。上述の作業を繰り返すことにより、長時間運転を続けることができる。

【0068】本実施の形態では常温で気体であり、しかも反応性の低い希ガスを用いているため、プラズマ生成に伴いターゲット材料が飛散した場合でも、プラズマ周辺におかれた光学素子を汚染することはない。また、本方式では標的材料が液柱状であるため、液滴の場合のように、標的材料の生成と電極に印加するパルスとの同期をとる必要がないので、装置構成がより単純になる。本実施の形態は、請求項3、請求項8に対応する。

【0069】本実施の形態ではキセノンをターゲット材料に使用したが、これに限るものではない。たとえば、クリプトン(Kr)や酸素(O)ガス、酸素の化合物ガス、フッ素(F)ガス、フッ素の化合物ガスなどであってもよい。XeやKrは波長11nm近傍にピークをもち、波長9～15nmにわたって連続的なスペクトルを発する。また、酸素は13nmや15nmに、フッ素は14nmに強いラインスペクトルを持つので、これらの標的材料を用いて、Mo/SiやMo/Beなどの多層膜ミラーを用いた縮小露光装置の光源に適している。

【0070】また、生成したプラズマシートが上方に移動し、アノード電極205の上端付近でフォーカスされるようにし、液柱206がその位置を通過したときにプラズマ化されるようにしているが、図2においてアノード電極205、カソード電極204、絶縁部材207で構成されてい



る部分の上下を反転させて、図2におけるA側を上側とし、こちら側から液柱206がアノード205中を通過するようにして、液柱206がアノード電極205から外に出るときにプラズマ化されるようにしてもよい。また、この場合には液柱を形成するノズル203がアノード電極となるように、プラズマ発生部を形成するようにしてもよい。このようにすれば、請求項9にも対応するものとすることができる。

【0071】図3に、本発明の実施の形態であるX線発生装置の第3の具体的な構成の概要を示す。本実施の形態でもDPF型の放電プラズマX線源が用いられている。本実施の形態ではアノード電極が超音速ノズルを兼ねている。すなわち、超音速ノズルであるアノード電極301はモリブデン(Mo)でできている。アノード電極301の一方の端には導電性の部材304が取り付けられており、アノード電極301への電流の供給はここから行われている。カソード電極302も同様にモリブデン(Mo)で作られており、カソード電極302は真空容器300に接地されている。アノード電極301とカソード電極302の間に高電圧のパルス印加すると絶縁部材303の表面からプラズマシートが発生し、電極間を上昇して、アノード電極301の先端部にフォーカスされるようになっている。なお、DPFの電源部は省略してある。

【0072】また、アノード電極301は絶縁板305を介してパルスバルブ306に接続されており、パルスバルブはXeガスのポンプ313、314に接続されている。バルブ317、318は閉じられ、バルブ315、316は開けられていて、Xeガスはポンプ314から供給されている。このとき、パルスバルブの背圧は30気圧である。制御装置(不図示)からノズル駆動装置(不図示)にトリガー信号が入力され約1msだけパルスバルブ306が開き、Xeガスがノズル(アノード電極)301から噴出する。ノズル301はラバールノズルであり、ガスは超音速のガス流307となって噴出する。

【0073】真空中に噴出したガスは断熱膨張により冷却され、ファン・デル・ワールス力によりXeガス原子が互いにくっつきあい、大きなクラスター分子となる。また、超音速ガス流であるためノズルから噴出された後でもガス(クラスター)の広がりが少なく、プラズマがフォーカスする位置でも高密度の状態を維持できる。

【0074】パルスバルブ306が開いてから数100 $\mu$ s後にノズル301先端部のガス密度がピークになるので、この時にプラズマがアノード電極301の先端でフォーカスするように、制御装置(不図示)からスイッチング素子にトリガー信号が出力される。

【0075】ノズル301から噴出されたXeガスの大部分はノズル301の対向位置に置かれているガス収集部材308、バルブ320を介して排気装置310により排出される。残りの部分は真空容器300内のガスを排気している排気装置311により、バルブ319を介して真空容器外に排出さ

れる。排出されたXeガスはコンプレッサー312により圧縮され、ポンプ313に蓄積される。運転を続けて、ポンプ314のキセノンガスがなくなったならばバルブ315、316を閉じ、バルブ317、318を開け、ポンプ313からキセノン进行供給するとともにポンプ314を回収用として使用する。上述の作業を繰り返すことにより、長時間運転を続けることができる。

【0076】ガス噴出方向に直交する位置にMo/Siからなる多層膜ミラー309が配置されており、プラズマから輻射されたX線のうちMo/Siの周期構造によって決まる波長13.5nmのX線のみが反射され、後段の光学系へ導かれている。

【0077】本実施の形態によれば、超音速ノズルによりプラズマフォーカス部に高密度ガスを供給できるので、電極周辺の薄い雰囲気ガスを使用する従来の方式に比べて、強力なX線を発生させることができる。また、アノード電極部に高速ガスが流れるので、放電により発生した飛散粒子を下流方向に吹き飛ばすことができる。このため、ガス流に対して直交方向に配置された光学素子への飛散粒子付着量を低減することもできる。さらに、放電により加熱されたアノード電極を高速ガス流により冷却する効果もある。

【0078】本実施の形態ではアノード電極、カソード電極ともモリブデン(Mo)で作られている。Moはおおよそ波長6~14nmの範囲で透過率がWの透過率に比べて圧倒的に高い。しかもMoは多層膜の構成元素の一つであるため、電極が放電により削り取られて飛散し、光学素子上に付着したとしても透過率の低下は小さく、より長時間運転を続けることができる。一般に、多層膜は反射するX線に対して屈折率の高い物質と、透過率の高い物質の組み合わせになっているので、本実施の形態のように多層膜ミラーに用いられている透過率の高い物質により電極やその周辺部材を構成すれば、これらの飛散粒子が多層膜ミラーに付着・堆積しても反射率の低下を低減することができる。

【0079】また、最初のプラズマシートが生成されるアノード-カソード間の絶縁板303は石英ガラス(SiO<sub>2</sub>)でできている。よって、アノード-カソード間の縁面放電によりSiO<sub>2</sub>上で発生したプラズマシートがSiO<sub>2</sub>の表面を削り取り、光学素子上に付着したとしても、Siは吸収端である12.4nmよりも長波長側で透過率が高いので、反射波長13.5nmに対する減衰は小さく、長時間運転しても反射率の低下は少ない。SiO<sub>2</sub>はプラズマ及びプラズマから輻射される紫外光やX線により、そのほとんどがSiと酸素に分解される。分解された酸素分子(O<sub>2</sub>)や酸素の化合物(CO<sub>2</sub>など)となって真空容器外に排出されるのでミラー上にはほとんど堆積しない。

【0080】電極や絶縁部材あるいはプラズマに曝される部材に使用される材料としては、本実施の形態で述べたものに限らず、利用するX線の波長に応じて透過率の

高い適当な材料を選んで使用することができる。たとえば、利用するX線の波長域がおおよそ5~10nmであれば、硼素(B)、K、Ca、Cl、S、P、Y、Zr、Nb、Mo、Tc、Ru、Rh、Pd、Ag、Cd、In、Te、Sn、Sb、Te、I、Cs、Baを、波長域がおおよそ10~20nmであれば、Be、P、S、Al、Si、K、Ca、Rb、Sr、Y、Zr、Nb、Mo、Tc、Ru、Rh、Cs、Ba、La、Ce、Smを、波長域がおおよそ20~40nmであれば、Li、K、Ca、Mg、Al、S、Cl、Rb、Sr、I、Te、Sb、Cs、Baなどを選べばよい。

【0081】電極や絶縁部材あるいはプラズマに曝される部材は上にあげた材料単独で作られていてもよいし、他の物質との混合物や化合物であってもよい。ただし、これら他の物質が使用するX線の波長に対して高い吸収率を有するものである場合は、これらの物質が真空容器内から排出されるようになっていなければならない。また、電極や絶縁部材あるいはプラズマに曝される部材の全体がこれらの材料によって構成されていてもよいし、他の材料(例えばステンレスやタングステンなど)で形成された部材の上に、上述の物質を含む物質をコートしてもよい。

【0082】また、本実施の形態では常温のXeガスを供給しているが、Xeガスを冷却して使用してもよい。供給するガスの温度を下げることにより、生成されるクラスター分子の大きさが大きくなるので、プラズマフォーカス部でのターゲット原子数密度が高くなり、X線強度が増加する。また、アノード電極の冷却にとってもより効果的である。本実施の形態は、請求項4、請求項5、請求項6、請求項8、請求項9、請求項11に対応するものである。

【0083】本実施の形態においては標的材料はガス状のものであるが、ガス中に固体微粒子や液体微粒子を混入させノズルから噴出させてもよい。例えば、リチウム(Li)、水素化リチウム(LiH)、水酸化リチウム(LiOH)やフッ素化リチウム(LiF)、錫(Sn)、酸化錫(SnO<sub>2</sub>)、H<sub>2</sub>O(氷)、ドライアイス(CO<sub>2</sub>)、有機物微粒子(例えばラテックス球など)、銅(Cu)、ニッケル(Ni)、アルミニウム(Al)、鉄(Fe)、セラミックスなどの固体微粒子や水(H<sub>2</sub>O)、アルコール、液化希ガス(液化キセノン、液化クリプトンなど)、液化窒素などの液体をガス中に混入させて噴出させてもよい。このようにすれば、請求項7に対応するものとして行うことができる。

【0084】液体をガスに混合して噴出させる場合、霧状になってノズルから噴出される。Liは13.5nmに強い線スペクトルの発光があり、Snは13nm付近を中心に強いバンドスペクトルがあるため、13nmのX線を用いたX線縮小露光用の光源に適している。微粒子を混入させるガスは、単に微粒子の搬送用として用いるのであれば、発生したX線を吸収しないように、ヘリウム(He)のようなX線の吸収の小さなガスを用いるのが好ましい。一方、搬送ガスもX線発生用の標的材料として用いるならば、利

用しようとしている波長のX線を放出する物質を用いるのが好ましい。例えば、波長11~13nmの領域のX線を用いるのであれば、搬送ガスとして、この領域にスペクトルを有するキセノン(Xe)やクリプトン(Kr)を用いればよい。

【0085】本実施の形態ではノズルにラバルノズルを使用しているが、ノズルの形状はこれに限らずコニカル型のような他の形状であってもよい。また、本実施の形態では超音速流を用いているが、プラズマフォーカス部で十分な標的材料密度を確保できるならば、音速ノズルを用いてもよい。

【0086】また、本実施の形態ではパルスバルブによる標的材料をパルス的に噴出させているが、連続的に噴出するようにしてもよい。特に、放電の繰り返しが数kHz以上の場合にはパルスバルブの駆動が困難になるので、連続噴出の方が適している。また、ノズル駆動と放電との間で同期を取る必要もなくなるので装置構成が簡便になる利点もある。

【0087】図4に、本発明の実施の形態であるX線発生装置の第4の具体的な構成の概要を示す。この実施の形態においては、前記図1~図3に示した実施の形態と同様にDPFを用いているが、アノード電極自体を標的として用いている点が異なっている。すなわち、カソード電極402は真空容器400に取り付けられ、絶縁部材403を介してアノード電極401を保持している。アノード電極401とカソード電極402の間に高電圧のパルスを加えると絶縁部材403の表面からプラズマシートが発生し、電極間を上昇して、アノード電極401の先端部にフォーカスされるようになっていいる。なお、DPFの電源部は省略してある。そして、アノード電極401の先端部をプラズマ化し、その部分からX線を発生させる。

【0088】本実施の形態においては、長期間の放電により電極が削られて、電極の長さが短くなる場合に、常に電極長が一定になるように調整する機構が設けられている。すなわち、本実施の形態ではリチウム製のアノード電極401の下にアノード電極401と同じ材料(Li)を溶融するための炉406が設けられている。アノード電極401の先端位置はCCDカメラ409により常時あるいは定期的にモニターされている。照明用光源412から発せられた光は照明用レンズ413、窓414を介してアノード電極401を照明する。照明光のアノード電極透過光あるいは反射光は、窓415を通った後、対物レンズ416によりCCDカメラ409上に拡大され結像される。CCDカメラ409の映像はフレームメモリ410により取り込まれ、さらにコンピュータ411に取り込まれる。

【0089】まず、運転開始前のアノード電極401の像をコンピュータ内に取り込んでおく。運転中は常時あるいは定期的にアノード電極401の像をコンピュータ内に取り込み、運転開始前のアノード電極像と比較する。比較の結果、アノード電極401の先端位置が許容範囲を超

えていたならば、炉406に取り付けられているヒーター407に電流を供給し炉406内のリチウムを溶融する。リチウムの融点は179℃である。リチウムが溶けたらバルブ408を開けて配管404より窒素ガスを炉406内に導入し、その圧力により、溶融したリチウムをアノード電極401方向（図4の上方）に押し出す。炉406とアノード電極401の間には電極の形状を決める成型部405がある。

【0090】成型部405は冷却水（不図示）により冷却されており、溶融されたリチウムがここを通過するときアノード電極の形状に整形されて電極401の方向に移動する。CCDカメラ409による観察により所定の位置にアノード電極が到達したことが確認されたならば、バルブ408を閉じて窒素ガスによる加圧をやめ、アノード電極の移動を停止する。

【0091】このようにすることにより、アノード電極を連続的又は断続的に供給することができるので、従来のように装置の運転を止めて放電によって短くなった電極を交換する必要がなく、運転効率が向上する。また、アノード電極先端位置が常に同じ場所に維持されるので、放電が安定してX線強度が安定すると共に、X線発生位置の変動も低減することができる。本実施の形態は、請求項1、請求項2に対応する。

【0092】本実施の形態ではアノード電極の照明がクリティカル照明になっているが、これはケーラー照明であってもかまわない。また、本実施の形態では、アノード電極像を観測することによりアノード電極先端位置を求め、これを制御していたが、この方法に限らず、触針式のセンサーや非接触式のセンサー（レーザー変位センサーなど）等を用いて、アノード電極先端位置の計測を行ってもよい。この方法では、アノード電極位置が測定器により直接求められるので、計測系が単純になる利点がある。

【0093】本実施の形態ではアノード電極にリチウムを用いているが、これに限らず、所定の波長のX線を発生する材料で、電極として使用できるものであれば、どのような材料の電極であってもよい。また、本実施の形態では、電極の移動機構はアノード電極だけに設けられているが、カソード電極に設けてもよいし、両方に設けてもよい。

【0094】図5に、本発明の実施の形態の1例であるX線露光装置の概要を示す。このX線露光装置は、X線発生装置として、図3に示したものと同様なX線発生装置を使用している。図5において、放電プラズマX線源に高電圧パルス印加する電源部及び放電プラズマX線源の詳細は省略してある。また、ガスの回収及び循環装置についても省略している。

【0095】図3に示した実施の形態と同様に超音速ノズルを兼ねているアノード電極はモリブデン(Mo)でできており、絶縁板を介してカソード電極及びパルスバルブに接続されている。そしてこれらが、DPF電極部501

を構成している。カソード電極は支柱502により真空容器500に固定されている。

【0096】パルスバルブは配管及びフィードスルーを介してキセノンポンプ（不図示）に接続されており、パルスバルブの背圧は30気圧である。アノード電極に対向する位置にはガス回収用のロータリ収集部材504が取り付けられており、これによりアノード電極から噴出されたキセノンガスが、効率的に真空容器500外に排出されている。これとは別に真空容器内部は排気装置により排気されており、これら2つの排気装置により排出されたガスはコンプレッサーにより圧縮され回収し再利用される。ノズル先端部のガス密度がピークになる時にプラズマがアノード先端でフォーカスするように、制御装置からパルスバルブ及びスイッチング素子にトリガー信号が出力される。

【0097】ガス回収用の収集部材504を取り囲むように、Mo/Si多層膜をコートした回転放物面ミラー503が配置されている。このMo/Si多層膜は反射波長が13.5nmになるように多層膜の周期長が決定されている。放電プラズマから輻射されたX線はこの多層膜回転放物面ミラー503に入射し波長13.5nmのX線505のみが反射され、厚さ0.15nmのジルコニウム(Zr)からなる可視光カットX線透過フィルター506を透過後、真空容器512中の照明光学系507に入射する。

【0098】照明光学系507により照明領域を円弧状に整形し、IC回路パターンが形成されている反射マスク508を照明する。反射マスク508で反射したX線は、ミラー509及び投影光学系510を介して、1/4に縮小された反射マスク508状のパターンの像を、レジストが塗布されたシリコンウェハ511上に結像する。このとき、ウェハ511と反射マスク508は移動ステージ（不図示）上に取り付けられ、これらステージは同期してスキャンできるようになっていて、25×25mm角のICチップ全面を露光できるようになっている。この露光装置により、レジスト上で0.07μm/L/SのICパターンが露光できるようになっている。この実施の形態は、請求項4、請求項5、請求項6、請求項8、請求項12に対応する。

【0099】以上説明した各実施の形態においては、いずれも、放電プラズマX線源として、Dense Plasma Focus (DPF)を用いているが、本発明における放電プラズマX線源は、DPFに限らず、電極間の放電によってプラズマを生成しX線を発生させるものであれば、どのような形態の放電プラズマX線源であってもよい。

【0100】以下、本発明に係る半導体デバイスの製造方法の実施の形態の例を説明する。図8は、本発明に係る半導体デバイス製造方法の一例を示すフローチャートである。この例の製造工程は以下の各主工程を含む。

①ウェハを製造するウェハ製造工程（又はウェハを準備するウェハ準備工程）

②露光に使用するマスクを製作するマスク製造工程（又

はマスクを準備するマスク準備工程)

③ウェハに必要な加工処理を行うウェハプロセッシング工程

④ウェハ上に形成されたチップを1個ずつ切り出し、動作可能にしめるチップ組立工程

⑤できたチップを検査するチップ検査工程

なお、それぞれの工程はさらにいくつかのサブ工程からなっている。

【0101】これらの主工程の中で、半導体のデバイスの性能に決定的な影響を及ぼす主工程がウェハプロセッシング工程である。この工程では、設計された回路パターンをウェハ上に順次積層し、メモリやMPUとして動作するチップを多数形成する。このウェハプロセッシング工程は以下の各工程を含む。

①絶縁層となる誘電体薄膜や配線部、あるいは電極部を形成する金属薄膜等を形成する薄膜形成工程(CVDやスパッタリング等を用いる)

②この薄膜層やウェハ基板を酸化する酸化工程

③薄膜層やウェハ基板等を選択的に加工するためにマスク(レチクル)を用いてレジストのパターンを形成するリソグラフィー工程

④レジストパターンに従って薄膜層や基板を加工するエッチング工程(例えばドライエッチング技術を用いる)

⑤イオン・不純物注入拡散工程

⑥レジスト剝離工程

⑦さらに加工されたウェハを検査する検査工程

なお、ウェハプロセッシング工程は必要な層数だけ繰り返し行い、設計通り動作する半導体デバイスを製造する。

【0102】図9は、図8のウェハプロセッシング工程の中核をなすリソグラフィー工程を示すフローチャートである。このリソグラフィー工程は以下の各工程を含む。

①前段の工程で回路パターンが形成されたウェハ上にレジストをコートするレジスト塗布工程

②レジストを露光する露光工程

③露光されたレジストを現像してレジストのパターンを得る現像工程

④現像されたレジストパターンを安定化させるためのアニール工程

以上の半導体デバイス製造工程、ウェハプロセッシング工程、リソグラフィー工程については、周知のものであり、これ以上の説明を要しないであろう。

【0103】上記リソグラフィー工程の中の②の露光工程に、本発明に係るX線露光装置を用いると、線幅の小さなパターンの露光転写を行うことができる。そして、これらX線露光装置は、長時間の連続運転が可能であるので、本発明の半導体デバイスの製造方法によれば、スループット良く半導体デバイスを製造することができる。

【0104】

【発明の効果】以上説明したように、本発明のうち請求項1から請求項4に係る発明においては、長時間の連続運転が可能となり、設備の稼働効率を高めることができる。請求項5に係る発明においては、プラズマの発生効率を高め、これによりX線の強度を上げることができる。請求項6に係る発明においては、ガスの密度を高密度にすることができ、X線の強度を上げることができると共に、溶解したり削り取られた物質を、真空容器の外に排出するのが容易となる。請求項7に係る発明においては、X線の発生強度を上げることができると共に、微粒子の搬送が容易となる。

【0105】請求項8に係る発明においては、標的材料が拡散しないので、高強度のX線を発生させることができる。請求項9に係る発明においては、プラズマがフォーカスされる位置に確実に標的材料を送出することができるので、X線の強度を上げることができる。

【0106】請求項10に係る発明においては、半導体製造等に使用される露光転写装置に適当な13nm程度の波長のX線を発生することができると共に、安全で取り扱いが容易な標的部材を用いることができる。

【0107】請求項11に係る発明においては、電極等がプラズマに曝されて溶解したり、削り取られたりして飛び散って、光学素子表面に付着しても、光学素子の反射率や透過率の低下を低く抑えることができる。よって、長時間連続稼働可能なX線発生装置とすることができる。

【0108】請求項12に係る発明においては、それぞれ用いるX線発生装置と同じ効果が得られ、長時間連続運転できるX線露光装置、X線の発生効率の良いX線露光装置、安全性が高いX線露光装置とすることができる。

【0109】請求項13に係る発明においては、半導体デバイス製造のスループットが良い半導体デバイスの製造方法、安全性の高い半導体デバイスの製造方法とすることができる。

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明の実施の形態であるX線発生装置の第1の具体的な構成の概要を示す図である。

【図2】本発明の実施の形態であるX線発生装置の第2の具体的な構成の概要を示す図である。

【図3】本発明の実施の形態であるX線発生装置の第3の具体的な構成の概要を示す図である。

【図4】本発明の実施の形態であるX線発生装置の第4の具体的な構成の概要を示す図である。

【図5】本発明の実施の形態の1例であるX線露光装置の概要を示す図である。

【図6】本発明の実施の形態の基本構成の1例を示す概要図である。

【図7】本発明の実施の形態の基本構成の他の例を示す

概要図である。

【図8】本発明に係るX線露光装置を利用した半導体デバイスの製造方法を示す図である。

【図9】リソグラフィー工程の概要を示す図である。

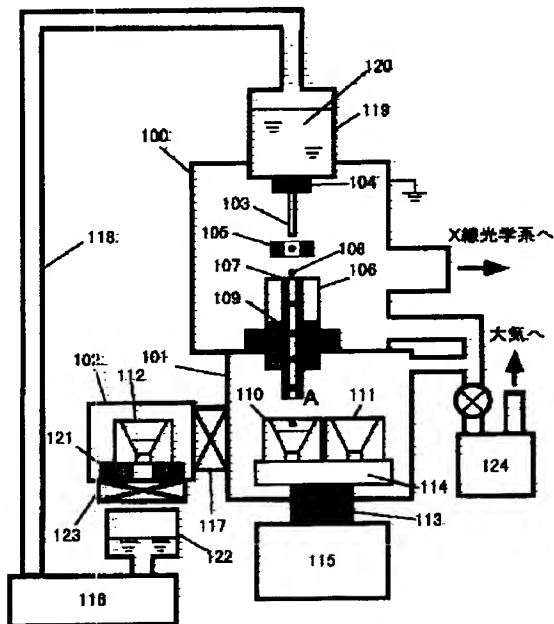
【図10】DPF方式の放電プラズマX線源の原理を示す図である。

【符号の説明】

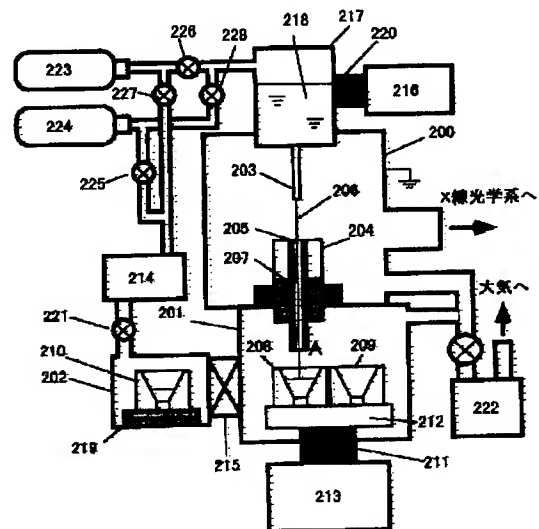
100、101、102…真空容器、103…ノズル、104…ピエゾ振動子、105…粒子検知器、106…カソード電極、107…アノード電極、108…液滴状の標的材料、109…絶縁部材、110、111、112…トラップ、113…熱伝導体、114…冷却ステージ、115…液体窒素貯蔵槽、116…ポンプ、117…ゲートバルブ、118…配管、119…標的溜まり、120…標的材料、121…加熱ステージ、122…容器、123…ゲートバルブ、124…真空排気装置、200、201、203…真空容器、203…ノズル、204…カソード電極、205…アノード電極、206…液柱状の標的材料、207…絶縁部材、208、209、210…トラップ、211…熱伝導体、212…冷却ステージ、213…液体窒素貯蔵槽、214…コンプレッサー、215…ゲートバルブ、216…液体窒素貯蔵槽、217…標的溜まり、218…標的材料（液化キセノン）、219…加熱ヒーター、220…熱伝導体、221…バルブ、222…真空排気装置、223、224…ポンプ、225～228…バルブ、300…真空容

器、301…アノード電極（ノズル）、302…カソード電極、303…絶縁部材、304…導電性の部材、305…絶縁板、306…パルスバルブ、307…ガス流、308…ガス収集部材、309…多層膜ミラー、310、311…排気装置、312…コンプレッサー、313、314…ポンプ、315～320…バルブ、400…真空容器、401…アノード電極、402…カソード電極、403…絶縁部材、404…配管、405…電極整形部材、406…炉、407…ヒーター、408…バルブ、409…CCDカメラ、410…フレームメモリ、411…コンピュータ、412…ランプ、413…レンズ、414、415…窓、416…レンズ、500、512…真空容器、501…DPF電極部、502…支柱、503…多層膜放物面ミラー、504…収集部材、505…X線、506…可視光カットX線透過フィルター、507…照明光学系、508…反射マスク、509…ミラー、510…投影光学系、511…ウェハ、512…真空容器、800…標的溜まり、801…ノズル、802…微粒子状標的、803、804…標的位置検出器、805…アノード電極、806…カソード電極、807…絶縁部材、900…真空容器、901…アノード電極、902…カソード電極、903…絶縁部材、904…絶縁部材、905…直線ステージ、906…ランプ、907…レンズ、908、909…窓、910…レンズ、911…CCDカメラ、912…フレームメモリ、913…コンピュータ、914…接触子

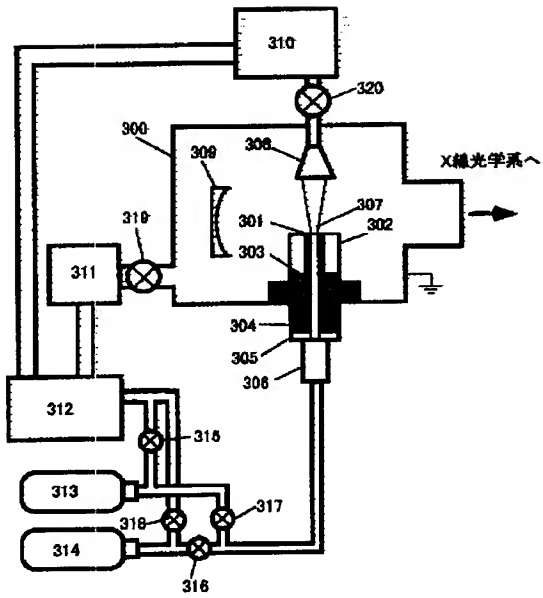
【図1】



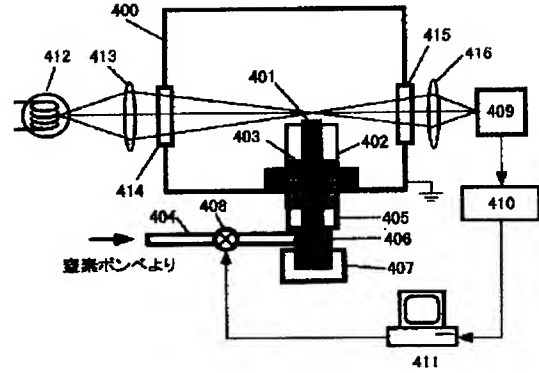
【図2】



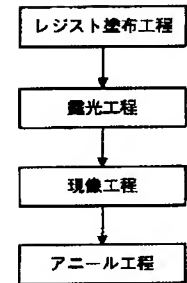
【図3】



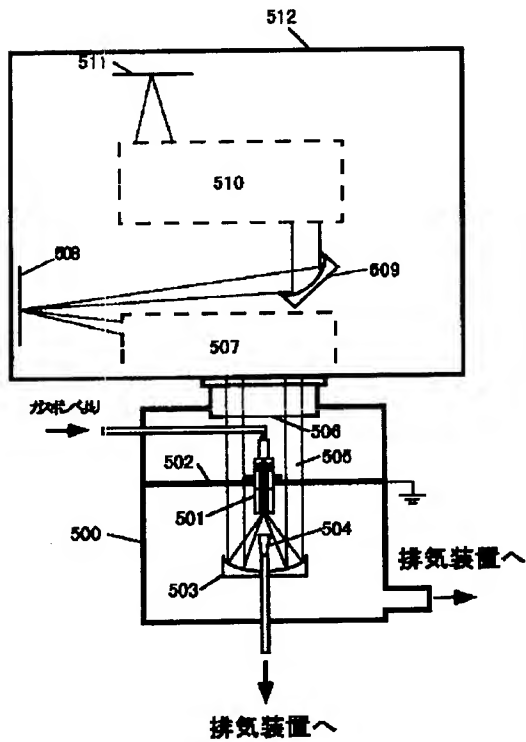
【図4】



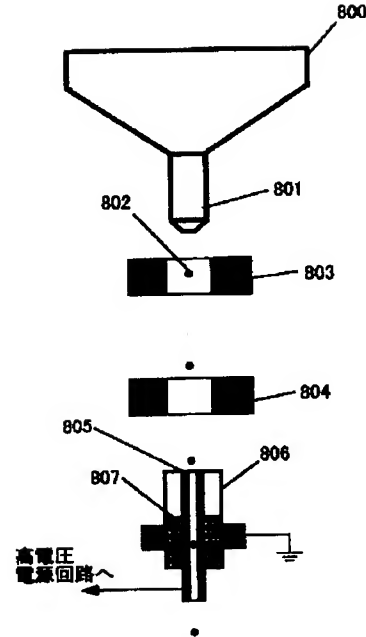
【図9】



【図5】

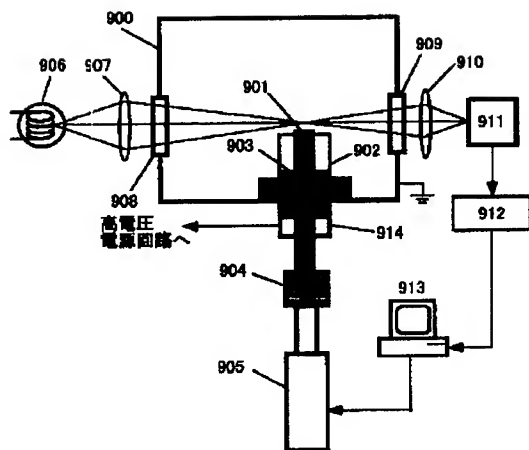


【図6】

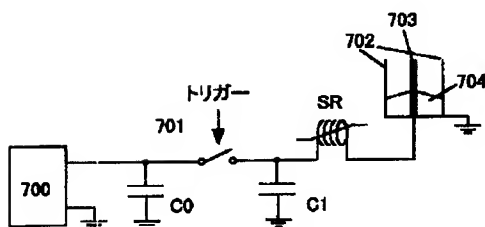




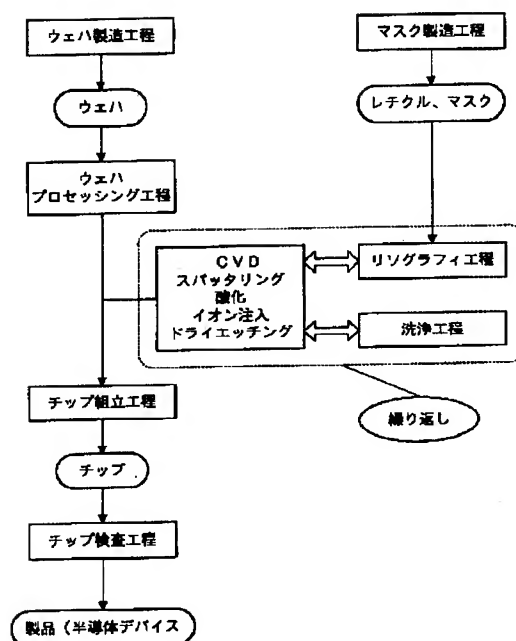
【図7】



【図10】



【図8】



フロントページの続き

(72)発明者 白石 雅之  
東京都千代田区丸の内3丁目2番3号 株  
式会社ニコン内  
(72)発明者 杉崎 克己  
東京都千代田区丸の内3丁目2番3号 株  
式会社ニコン内

Fターム(参考) 4C092 AA04 AA07 AA14 AA15 AA16  
AB21 AC09 BD18 BD19  
5F004 AA16 BA20 BD07 CA02  
5F046 GA03 GA06 GA09 GB01 GC03  
GD10